

## 坑道における通気の熱工学的研究

著者	幾世橋 広
号	137
発行年	1970
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11086">http://hdl.handle.net/10097/11086</a>

氏 名 ( 本 籍 )	幾 世 橋 広 ( 福 島 県 )
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 第 1 3 7 号
学位授与年月日	昭和 4 6 年 3 月 8 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和 3 6 年 3 月 東北大学大学院工学研究科鉱山工学専攻修士 課程修了
学 位 論 文 題 目	坑道における通気の熱工学的研究

( 主 査 )

審 査 委 員	教授 吉 沢 幸雄	教授 堀 部 富男
	教授 武 山 斌郎	教授 石 浜 渉
	教授 大 谷 茂盛	

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、坑道における通気の熱工学について、著者の実験研究の結果を述べたものであるが、特に坑道における通気の温度上昇の推算に必要であり、かつ、従来あまり研究の行なわれていない、坑道壁面から通気への熱伝達率に関し、模型坑道ならびに実際坑道における実験研究の結果をまとめたもので全 7 章からなる。

第 1 章は、緒論で本研究の目的について述べたものである。すなわち、本研究は坑道壁面から通気への熱伝達率に影響を与える種々の要因のうち、主として、流れが十分に発達した区間において、坑道壁面の粗さが坑道の摩擦係数と平均熱伝達率にどのような影響を与えるかを、模型坑道によって実験的に究明し、その結果を用いて実際坑道の通気温度の上昇値を予測することを目的とする。また、流れが十分に発達するまでの助走区間では、局所熱伝達率は、助走区間開始点からの距離に

よってどのように変化するか，さらに通気分量門の開口比によって，それがどのように変わるかを明らかにし，もって，より正確な坑内通気温度の推算に寄与しようとするものである。

第2章は，本研究を行なうために著者が試作した模型実験の装置と実験方法ならびに実験の条件と範囲などについて述べたものである。すなわち，模型坑道には，その壁温分布を実際坑道における壁温分布に近似させるため，その主材に熱伝導率 $\lambda$ 〔K cal/mh℃〕が石炭（ $\lambda \div 0.2$ ）および岩石（ $\lambda \div 0.7 \sim 4.0$ ）に近い値をもつ内径 $D = 49.0$  mm，長さ7000 mmの硬質ゴム（ $\lambda \div 0.3$ ）円管を使用した。

模型坑道の内壁の種類は，次の3種である。すなわち，①坑道壁面の粗さが極めて小さい場合として，内壁に粗さ要素を使用しないもの。〔本論文では，これを平滑模型坑道と称する（推定相対粗さ $h/D_m = 1.0 \times 10^{-3}$ ， $D_m$  = 平均直径〔mm〕， $h$  = 粗さ要素の高さ〔mm〕）〕。②粗さが比較的小さい場合として，前者の内壁に砂粒あるいはガラス粒の粗さ要素をはりつけたもの。〔これらを砂粒系およびガラス粒系の粗面模型坑道と称する（ $h/D_m = 3.16 \times 10^{-3} \sim 9.98 \times 10^{-2}$ ）〕。③粗さが比較的大きく，かつ，その配列が規則的に流れを収縮・拡大するような場合として，①の内壁に断面の形状がそれぞれ，矩形，二等辺三角形および半円形をなす円環状粗さ要素を等間隔にはりつけたもの。〔これらを矩形系，三角形系および半円形系の粗面模型坑道と称する（ $h/D_m = 4.08 \times 10^{-2} \sim 1.51 \times 10^{-1}$ ， $P/h = 1.8 \sim 128$ ， $P$  = 粗さ要素のピッチ〔mm〕）〕。

模型坑道の加熱は，その外周に温水を循環させることにより行なった。

また，上記の模型坑道で得た熱伝達率と壁温一定の場合における熱伝達率の測定結果とを比較するため，模型坑道（平滑および矩形系の粗面の一部）に銅（ $\lambda \div 330$ ）円管を使用し同様の実験を行なった。

熱伝達率の測定方法としては，局所熱伝達率 $\alpha_x$ 〔K cal/m<sup>2</sup>h℃〕の測定には熱流法を用い，平均熱伝達率 $\alpha$ 〔K cal/m<sup>2</sup>h℃〕の測定にはエンタルピ法を用いた。

実験は定常状態で行ない，模型坑道を加熱する温水の温度は $60.0 \pm 0.1$ 〔℃〕である。ただし，助走区間の熱伝達に関する実験のうち，分量門がない場合は $65.0 \pm 0.1$ 〔℃〕，分量門がある場合は $50.0 \pm 0.1$ 〔℃〕とした。測定したレイノルズ数 $Re$ の範囲は $4.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ およびプラント数 $Pr$ は0.71である。

第3章は，平滑模型坑道に実際坑道の壁温分布と類似の温度分布を与えて，助走区間における局所熱伝率 $\alpha_x$ の変化を究明した実験の結果について述べたものである。すなわち， $\alpha_x$ が一定値になるまでの助走区間の長さ（ $X/D$ ）は，伝熱条件が壁温一定あるいは熱流束一定の場合の従来の研究結果による値（ $X/D = 7 \sim 35$ ）より大で，本実験装置により著者の行なったレイノルズ数

$Re = 4.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$  の範囲内においては、分量門の有無および開口比に関係なく  $X/D \div 60 \sim 80$  であることを明らかにした。ただし、 $X$  = 模型坑道入口からの距離 [mm] である。

分量門がある助走区間における  $\alpha_x$  は、分量門の開口比  $M$  と分量門からの距離 ( $X/D$ ) およびレイノルズ数  $Re$  によって決定されることを明らかにした。すなわち、 $\alpha_x$  は、 $M$  および  $X/D$  が一定であれば、 $Re$  の増加とともに増加するが、著者の行った  $M = 0.24 \sim 0.81$  の範囲において、 $\alpha_x$  が  $M$  の影響を最も強く受けるのは  $X/D = 2.08 \sim 4.17$  付近で、 $X/D$  の増加とともにその影響は少なくなる。また、分量門に極く近い区間 ( $X/D = 0.208$ ) では、 $\alpha_x$  は、 $M$  が小さくなるにつれて小さくなるが、 $X/D = 1 \sim 2$  から約 10 までは  $M$  の減少とともに増加する。さらに、これらの結果から  $X/D = 0.2 \sim 2.0$  のあいだに、 $\alpha_x$  が  $M$  の影響を受けない区間があると考えられる。

第4章は、実際坑道の壁温分布に類似の壁温分布が得られるように、硬質ゴムを使用した模型坑道における平均熱伝達率  $\alpha$  と、壁温一定の条件が得られるように、銅を使用した模型坑道におけるそれと、いかな様な相違があるかを平滑および矩形系の粗面模型坑道につき究明し、その結果得られた二・三の知見について述べたものである。すなわち、硬質ゴム製の模型坑道の  $\alpha$  と銅製の模型坑道の  $\alpha$  と比較すると、平滑模型坑道のときは、レイノルズ数  $Re$  が低い場合 ( $Re \div 8.0 \times 10^3$ ) は 10 数%、 $Re$  が高い場合 ( $Re \div 8.0 \times 10^4$ ) は 20 数%、前者は後者より小さくなる。また、壁面が粗いときには、 $Re$  に関係なく前者は後者より約 25% 小さくなる。このことは伝熱面における壁面各部および坑道軸方向の温度分布の差異にもとづくものであると考えられる。

さらに、矩形系の粗面模型坑道における摩擦係数と熱伝達率に影響をおよぼす渦の状態を、粗さ要素のピッチを組織的に変化させて観察した。それをもとに、同系の粗面模型坑道における平均熱伝達率  $\alpha$ 、粗面各部の局所熱伝達率  $\alpha_x$  および摩擦係数  $f$  におよぼす粗さ要素ピッチ  $P$  の影響について境界層論的な解釈を与えるとともに、 $P$  が小さく、また粗さ要素の高さ  $h$  が大きくなると、壁面の平滑な場合よりも  $\alpha$  が小さくなる場合の現象を、粗面各部の  $\alpha_x$  を測定することにより定性的に明らかにした。

さらに、粗さによって渦ないし、よどみ層が生ずるような流路内で、 $\alpha$  と  $f$  との定量的な関連性を論ずる場合には、熱伝達率としては、上記の定性的な現象を考慮して、見掛け伝熱面積 (平均直径  $D_m$  を直径とする直円筒面積) を用いた平均熱伝達率  $\alpha_m$  ないし平均ヌセルト数  $Num (= \alpha_m D_m / \lambda)$  が実用上便利であることを明らかにした。

第5章は、前章で得られた矩形系の粗面模型坑道における平均熱伝達率  $\alpha$  および  $\alpha_m$  と摩擦係数  $f$  に関する知見を基礎に、熱の不良導体からなる三角形系、半円形系、砂粒系およびガラス粒系の粗面模型坑道における  $\alpha$  と  $f$  におよぼす粗さ要素の形状、高さ  $h$  およびピッチ  $P$  などの影響を明ら

かにした結果を述べたものである。すなわち、矩形系、三角形系および半円形系の粗面模型坑道における $f$ については、 $P$ が一定で、レイノルズ数 $Re$ が $1.0 \times 10^4$ 以上の場合には、 $h$ の大小に関係なく、三角形系の $f$ が一番大きく、矩形系がそれに次ぎ、半円形系の $f$ が一番小さいという結果が得られた。ただし、矩形系と半円形系の $f$ の大小関係については、 $P$ が大きいとき上記の関係が成り立つが、 $P/h < 6 \sim 9$ になるとこの関係が逆になり半円形系の $f$ が矩形系のそれより大きくなる。また、 $f$ の最大値を与える $P/h$ の値は、粗さ要素の形状に関係なく約1.07であることを明らかにするとともに、上記の諸現象に境界層論的な説明を加えた。

さらに、砂粒系およびガラス粒系の粗面模型坑道における $f$ については、Nikuradseの同様な測定結果があるが、著者は、同氏の測定した $Re$ の範囲内で、同氏の測定最大相対粗さ( $h/D_m = 3.33 \times 10^{-2}$ )より大きな $9.98 \times 10^{-2}$ まで測定を行なった。その結果 $h/D_m$ が小さいところではNikuradseの測定結果とほぼ一致するが、 $h/D_m$ が大きいところでは、 $Re > 1.0 \times 10^4$ において、 $h/D_m = 4.37 \times 10^{-2}$ では $f = 0.09$ 、 $h/D_m = 9.98 \times 10^{-2}$ では $f = 0.12$ となった。

矩形系、三角形系および半円形系の粗面模型坑道における $\alpha$ については、 $Re =$ 一定で、 $h/D_m \geq 8.2 \times 10^{-2}$ の場合には、三角形系と半円形系とでは、 $\alpha$ の大きさはほとんど同じであるが、矩形系の場合は、前二者よりかなり小となる。 $h/D_m \leq 4.6 \times 10^{-2}$ の場合は、 $\alpha$ におよぼす形状の影響はあまりない。 $\alpha$ の最大値を与える $P/h$ の値は、 $h/D_m \geq 8.2 \times 10^{-2}$ では、粗さ要素の形状に関係なく、 $h/D_m = (1.2 \sim 1.5) \times 10^{-1}$ では約9.5、 $h/D_m = (8.2 \sim 9.3) \times 10^{-2}$ では約1.4であるが、 $h/D_m = (4.1 \sim 4.6) \times 10^{-2}$ では、矩形系および半円形系の場合9.0、および三角形系の場合は約1.5であった。

砂粒系およびガラス粒系の粗面模型坑道においては、 $\alpha_m$ は $h/D_m$ の増加とともに増加する傾向はあるが、 $h/D_m \leq 1.3 \times 10^{-2}$ かつ $Re \leq 2.0 \times 10^4$ の場合には、粗面が流体力学的になめらかとなるため、 $\alpha_m$ も平滑模型坑道における値とほとんど等しくなる。また、逆に $h/D_m \geq 4.4 \times 10^{-2}$ かつ $Re \geq 2.0 \times 10^4$ の場合には、 $\alpha_m$ におよぼす $h/D_m$ の影響はほとんどなくなることを明らかにした。

以上の $\alpha_m$ と $f$ の測定結果を次式

$$Num = C Re_m Pr^{0.5} \quad (1)$$

の形で整理すると、各系の粗面模型坑道における $\alpha_m$ と $f$ との整理式は次のようになる。ただし、上式において、 $C$ および $m$ は実験定数、および $Re^*$ は修正レイノルズ数( $= Re \sqrt{f/8}$ )である。すなわち、

$$\text{矩 形 系:} \quad N u m = 0.33 R e_{*}^{0.74} P r^{0.5} \quad (2)$$

$$\text{三 角 形 系:} \quad N u m = 0.51 R e_{*}^{0.68} P r^{0.5} \quad (3)$$

$$\text{半 円 形 系:} \quad N u m = 0.46 R e_{*}^{0.72} P r^{0.5} \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{砂 粒 系} \\ \text{ガラス粒系} \end{array} \right\} : \quad N u m = 0.194 R e_{*}^{0.824} P r^{0.5} \quad (5)$$

また、著者の実験結果全体を総合して一つの実験式で表わせば、次の式が得られる。すなわち、

$$\text{総 合 式:} \quad N u m = 0.37 R e_{*}^{0.74} P r^{0.5} \quad (6)$$

なお、以上の実験式は、(2)式が±30%以内、(3)および(4)式が±25%以内、(5)式が±15%以内および(6)式が±45%以内の誤差で全実験点を包括している。

著者は、以上の本模型実験の結果を熱伝達の相似法則により拡張し、実際坑道における $\alpha_m$ を予測するため、次のことを提案した。すなわち、坑道における $\alpha_m$ の値を求める場合には、壁面の粗さが比較的小さい坑道においては(5)式を、および粗さが比較的大きく、かつその配列が規則的な坑道においては(2)、(3)および(4)式を用いればよい。さらに、各種坑道における通気の熱計算を概略的に行なう場合には、実用上(6)式を用いてもよい。

第6章は、上記諸実験式が実際坑道における平均熱伝達率 $\alpha_m$ を予測できるか否かを検証するため、常磐炭礦鹿島坑において坑道諸元、通気量、通気温度、岩盤内および岩盤表面温度などの測定を行ない、 $\alpha_m$ および摩擦係数 $f$ を求めて、前各章における模型実験との関連性について考察した結果を述べたものである。すなわち、流れが十分発達した坑道の区間においては、坑道の諸元あるいは $f$ がわかれば、上記諸実験式からよい精度で $\alpha_m$ をレイノルズ数 $Re$ の関数として求めることができることを実証した。

また、通気の坑道に沿っての温度上昇に関する基礎式を、いくつかの簡単な仮定から導き、本研究の結果から予測される $\alpha_m$ の値を用いて、通気の温度上昇値を求める手順を示した。

第7章は、結論であって、以上の研究結果の要約を述べたものである。

## 審 査 結 果 の 要 旨

鉾山において坑内通気計画を立てる際に、坑道壁面から通気への熱伝達率の値が通気温度の計算に必要であるが、これに関する研究は従来あまり行なわれていない。

本論文は、坑道壁面から通気への熱伝達におよぼす諸因子の影響を詳細に解明するために、各種の模型坑道ならびに実際の坑道による実験を行ない、それらの結果をまとめたもので、全文7章からなる。

第1章は、緒論で本研究の目的について述べたものである。

第2章では、模型坑道における実験装置および実験方法について述べている。模型坑道には実際の坑道における壁温分布を想定して、その構成材料に熱伝導率が石炭および岩石のそれに近い値をもつ硬質ゴムを用いている。これは従来の壁温一定あるいは熱流束一定の場合と異なり、本実験装置の特徴である。

第3章では、内壁が平滑な模型坑道において、分量門がある場合と分量門がない場合の助走区間における局所熱伝達率の値を詳細に求め、開口比などの影響を明らかにしている。また、助走区間の無次元長さについては、従来の壁温一定の結果より大きい値が得られている。

第4章および第5章は、本論文の主要部分である。第4章では、平滑ならびに矩形系の粗面模型坑道を用いて、伝熱条件が壁温一定の場合と坑道を勘案した壁温分布を与えた場合との平均熱伝達率が如何に相違するかを検討している。

第5章では、壁の粗さ要素が、三角形、半円形、砂粒およびガラス粒各系の各種粗面模型坑道の十分発達した流れの場における諸因子、すなわち、粗さ要素の形状、高さおよびピッチなどが坑道の摩擦係数および平均熱伝達率に与える影響を詳細に究明し、前章における矩形系粗面の結果と比較検討している。また粗面坑道を直円筒に換算した代表直径を用いた平均ヌセルト数 $Nu_m$ を摩擦速度を用いたレイノルズ数 $Re^*$ およびプラントル数 $Pr$ の関数で表わし、平滑および各粗面坑道の別なく応用できる実用式を提案し、坑内の通気計画に有効な指針を与えている。

第6章は、常磐炭礦鹿島坑における現場実験の結果について述べたもので、前各章における模型実験の結果が、かなりよい精度で実用できることを明らかにしている。

第7章は、結論である。

以上要するに、本論文は坑内通気計画を立てる際の通気温度計算に必要な坑道壁面から通気への熱伝達率について詳細に実験的研究を行ない、多くの新しい知見を得たもので、坑内通気工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。